



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH

ул. Жолио-Кюри 6, г. Дубна, Московская область, Россия, 141980 6, Joliot-Curie St, Dubna, Moscow Region, Russia, 141980  
Tel.: +7 (496) 216-50-59 Fax: +7 (495) 632-78-80 AT: 205493 WOLNA RU E-mail: post@jinr.ru http://www.jinr.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Международной  
межправительственной организации

Объединенного института ядерных исследований  
д.ф.-м.н., академик РАН

Г.В. Трубников

«28» апреля 2023 г.



**ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертацию

**Иванова Вячеслава Львовича**

**«Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  с детектором КМД-3»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий

**Актуальность темы диссертации**

В настоящее время в ИЯФ СО РАН продолжается цикл экспериментов с Криогенным Магнитным Детектором (КМД-3) на электрон-позитронном коллайдере ВЭПП-2000 в области энергий в системе центра масс ( $E_{c.m.}$ ) от 0,34 до 2,0 ГэВ. Одним из главных пунктов физической программы КМД-3 является прецизионное измерение эксклюзивных сечений  $e^+e^-$ -аннигиляции в адроны и измерение параметров промежуточных векторных мезонов  $\omega$ ,  $\phi$  и их возбужденных состояний. Прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений позволяет получить полное сечение аннигиляции в адроны, необходимое для вычисления адронного вклада в аномальный магнитный момент мюона  $(g-2)_\mu$  в рамках Стандартной Модели. На сегодняшний день наблюдаемое отличие между измеренным и вычисленным значениями этой величины составляет 4,2 стандартных отклонения. Отметим, что в проводимом в настоящее время во FNAL эксперименте по измерению  $(g-2)_\mu$  планируется достичь относительной точности в  $0,14 \times 10^{-6}$ , в то время как текущая точность вычислений этой величины составляет  $0,37 \times 10^{-6}$ .

Прецизионное измерение эксклюзивных адронных сечений, как правило, требует выделения достаточно чистого набора событий изучаемого конечного состояния. Последнее часто требует применения эффективной процедуры идентификации частиц, т.е. процедуры разделения электронов, мюонов, пионов и каонов и др. Вторая, методическая часть диссертации Иванова В.Л. посвящена разработке процедуры идентификации заряженных частиц с использованием многослойного жидкоксенонного (LXe) калориметра детектора КМД-3.

### **Оценка структуры и содержания диссертации**

Диссертация Иванова В.Л. состоит из введения, двух глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц с 99-ю рисунками и 5-ю таблицами. Список литературы содержит 61 наименование.

Во введении приводится обзор результатов предыдущих экспериментов по изучению процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$ , а также созданных в рамках других экспериментов многослойных ионизационных калориметров на основе сжиженных благородных газов. Обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, показаны новизна и практическая значимость проводимого исследования, а также представлены выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена изучению процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  с детектором КМД-3. Приводится описание процедуры отбора сигнальных событий в моде распада  $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ . Путем сравнения числа отобранных сигнальных событий с инвариантными массами пары каонов выше 1075 МэВ в моделировании и эксперименте автор приходит к выводу, что на основании имеющейся статистики невозможно утверждать наличие каких-либо других промежуточных механизмов рождения конечного состояния  $K^+K^-\eta$ , кроме  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ .

Далее процесс изучается инклюзивно по всем модам распада  $\eta$ , т.е.  $\eta$ -мезон рассматривается в качестве частицы отдачи. Такой подход позволяет существенно увеличить статистику сигнальных событий. Автор описывает процедуру отбора сигнальных событий, поправки к эффективности регистрации, вычисление видимого и борновского сечений, аппроксимацию сечения и определение параметров  $\phi'(1680)$ . В завершение первой главы приведен подробный анализ систематических ошибок измерения сечения и определения параметров  $\phi'(1680)$ , вычислен вклад процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  в величину  $(g-2)_\mu$ .

Вторая глава диссертации посвящена разработке новой методики идентификации заряженных частиц с использованием информации об их энерговыделении в слоях ионизационного калориметра на основе жидкого ксенона, установленного на детекторе КМД-3. Автор описывает идею процедуры идентификации, основанной на использовании методов машинного обучения – бустированных деревьев принятия решений (BDT). Работоспособность предложенной методики существенно зависит от степени согласия смоделированных и экспериментальных спектров энерговыделения частиц в калориметре. Автор приводит подробное описание разработанной им процедуры калибровки полосковых каналов калориметра, а также настройки

решений (BDT). Работоспособность предложенной методики существенно зависит от степени согласия смоделированных и экспериментальных спектров энерговыделения частиц в калориметре. Автор приводит подробное описание разработанной им процедуры калибровки полосковых каналов калориметра, а также настройки моделирования полосковых каналов для минимально ионизирующих и ливнеобразующих частиц. Далее автор проводит сравнение спектров откликов BDT для  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  в эксперименте и моделировании, убеждаясь в их хорошем согласии. Наконец, применение разработанной методики идентификации демонстрируется на примерах разделения конечных состояний  $e^+e^-\gamma$  и  $\pi^+\pi^-\gamma$  при  $E_{c.m.} < m_\phi$  и отборе конечного состояния  $K^+K^-$  при  $E_{c.m.} \sim 2$  ГэВ.

В заключении диссертации представлены итоги диссертационной работы, сформулированы ее результаты.

Основные результаты, представленные к защите, заключаются в следующем:

1. Проведено изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  в диапазоне  $E_{c.m.}$  от 1,59 до 2,007 ГэВ с детектором КМД-3 на основе  $59,5 \text{ пб}^{-1}$  интегральной светимости, набранной в 2011, 2012 и 2017-м годах.
2. На основе использованной в анализе статистики наблюдался только один промежуточный механизм рождения конечного состояния  $K^+K^-\eta$ :  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$ .
3. Сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  было измерено с лучшей, чем в предыдущих экспериментах, статистической точностью и систематической неопределенностью 5,1%.
4. Аппроксимация измеренного сечения позволила определить параметры  $\phi'(1680)$  с лучшей, чем в предыдущих экспериментах, статистической точностью и сравнимой с предыдущими измерениями систематической погрешностью.
5. Была разработана процедура идентификации заряженных частиц с LХе калориметром детектора КМД-3. Процедура использует удельные энерговыделения, измеренные в 12 слоях калориметра, в качестве входных переменных классификаторов BDT, натренированных на разделение  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$  в диапазоне импульсов от 100 до 1200 МэВ.
6. Для достижения согласия спектров откликов BDT в эксперименте и моделировании была разработана и применена процедура калибровки полосковых каналов с точностью  $\lesssim 1\%$ , а также проведена тщательная настройка отклика полосковых каналов в моделировании.
7. Было продемонстрировано согласие спектров откликов BDT в эксперименте и моделировании для  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$ ,  $\pi^\pm$  и  $K^\pm$ .
8. Применение разработанной процедуры идентификации было проиллюстрировано на примерах разделения конечных состояний  $e^+e^-\gamma$  и  $\pi^+\pi^-\gamma$  при  $E_{c.m.} < m_\phi$  и отборе конечного состояния  $K^+K^-$  при  $E_{c.m.} \sim 2$  ГэВ.

Сформулированные в заключении результаты соответствуют положениям, представленным для защиты во введении диссертации.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Измерено сечение процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  в диапазоне  $E_{c.m.}$  от 1,59 до 2,007 ГэВ со статистической точностью лучше, чем в предыдущих экспериментах. Аппроксимация измеренного сечения позволила определить параметры  $\phi'(1680)$  с лучшей к настоящему времени статистической точностью.
2. Впервые была разработана процедура идентификации типа заряженной частицы с использованием информации с нескольких слоев многослойного ионизационного калориметра на основе жидкого ксенона.

### **Научная и практическая значимость полученных результатов**

1. Улучшение точности измерения сечения процесса  $e^+e^- \rightarrow \phi\eta$  позволяет уточнить его вклад в аномальный магнитный момент мюона.
2. Уточнение параметров  $\phi'(1680)$  обладает научной ценностью и само по себе, и с точки зрения использования этих параметров для описания промежуточной динамики и сечений других адронных процессов.
3. Разработанная процедура идентификации типа частицы имеет большое значение для подавления фона при анализе ряда адронных процессов с КМД-3. Кроме того, продемонстрированная в данной работе принципиальная возможность идентификации адронов с ионизационным многослойным калориметром на основе жидкого ксенона стимулирует интерес к калориметрам подобного типа, ключевым достоинством которых является высокое координатное разрешение.

### **Замечания по диссертационной работе**

При сравнении спектров отклика бустированных деревьев принятия решений (BDT) на данных и в моделировании для заряженных каонов во второй главе было бы желательно использование контрольного процесса  $e^+e^- \rightarrow K_S K^\pm \pi^\pm$ . Идентификация нейтрального каона по вторичной вершине и только пиона по ионизационным потерям должна позволить отобрать более чистый и менее подверженный систематическим неопределенностям набор треков каонов.

В заключении указывается на перспективу дальнейшего изучения процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  и уменьшения статистических и систематических ошибок измерения сечения процесса и параметров  $\phi'(1680)$  на значительно большей статистике. Здесь нужно отметить, что такая работа потребует существенной доработки анализа, поскольку на данный момент статистические ошибки соизмеримы или менее систематических.

Данные замечания несколько не снижают качества данной работы и значимости полученных результатов.

**Заключение**    **Общелабораторного семинара**    **Лаборатории ядерных проблем**  
**ОИЯИ**

1. Содержание диссертационной работы Иванова Вячеслава Львовича «Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  с детектором КМД-3» соответствует паспорту научной специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий (пункты 4, 9, 11, 13 раздела «Направления исследований»). Диссертация представляет собой выполненную на высоком научном уровне законченную научно-исследовательскую работу. Результаты, полученные в первой части диссертации (уточнение параметров  $\phi'(1680)$ ), несомненно будут использованы физиками при анализе других адронных процессов. Разработанная во второй части диссертации методика идентификации частиц с жидкоксероном калориметром позволит подавить фон в ряде процессов, изучаемых с детектором КМД-3, а также послужит дополнительным стимулом к применению калориметров подобного типа в будущих экспериментах.

2. Представленные в работе результаты исследований актуальны, убедительны, обладают признаками новизны и оригинальности, выводы и заключения аргументированы и обоснованы.

3. Судя по публикациям и по докладу соискателя на семинаре, вклад автора в результаты представленной работы является определяющим. Выносимые на защиту положения подтверждают персональный вклад автора в представленную работу.

4. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии и в достаточной мере отражает содержание диссертации.

5. Диссертация Иванова В.Л. «Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  с детектором КМД-3» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным в п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Иванов Вячеслав Львович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.15. Физика атомных ядер и элементарных частиц, физика высоких энергий.

Отзыв составил:

начальник сектора № 2 Научно-экспериментального отдела встречных пучков  
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, кандидат физико-математических наук,  
специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Денисенко Игорь Игоревич

Тел.: +7 (496) 216-24-83, e-mail: iden@jinr.ru

Подпись \_\_\_\_\_

Дата \_\_\_\_\_

27.04.2023

Материалы диссертации Иванова В.Л. «Изучение процесса  $e^+e^- \rightarrow K^+K^-\eta$  с детектором КМД-3», а также отзыв на диссертацию рассмотрены и одобрены на Общелабораторном семинаре Лаборатории ядерных проблем Международной

межправительственной организации Объединенного института ядерных исследований 12 апреля 2023 г.

Руководитель Общелабораторного семинара Лаборатории ядерных проблем, заместитель директора Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ по научной работе, доктор физико-математических наук, специальность 01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Наумов Дмитрий Вадимович

Тел.: +7 (496) 216-59-12, e-mail: dnaumov@jinr.ru

Подпись 

Дата 28.04.2023

Подписи Денисенко И.И. и Наумова Д.В. заверяю:

Главный ученый секретарь ОИЯИ,

кандидат физико-математических наук

Неделько Сергей Николаевич

Подпись 

Дата 28.04.2023

Международная межправительственная организация  
Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ)

Почтовый адрес:

141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Тел.: +7 (496) 216-50-59, факс: +7 (496) 216-51-46

E-mail: post@jinr.ru

Сайт организации: <http://www.jinr.ru/>